



# NATURALIS

BOLETÍN DE LA COORDINACIÓN DE  
FÍSICA Y QUÍMICA

No. 38

Enero de 2023

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS



## Contenido

### 1 El Experimento de Stern-Gerlach. Parte 2

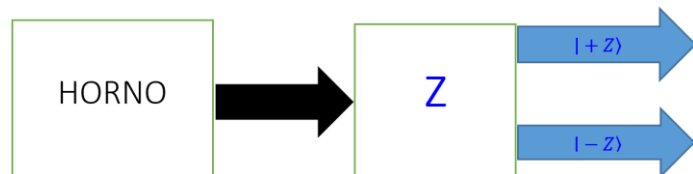
Salvador Enrique Villalobos Pérez  
Martín Bárcenas Escobar

## El Experimento de Stern-Gerlach. Parte 2

En este trabajo se describe y explica el Experimento de Stern-Gerlach empleando para ello el concepto, de la Computación y la Información Cuántica, conocido como Qubit.

Inicialmente dejemos que el término Qubit se refiera a un objeto matemático abstracto al que asignaremos ciertas propiedades específicas.

Con los antecedentes del experimento citados en el número anterior de este boletín representemos el experimento de Stern-Gerlach de la siguiente forma:



Lo que deseamos delinear es una forma más simple del experimento descrito en el boletín anterior usando para esto, por ejemplo, átomos de Hidrógeno; los cuales constan exclusivamente de un protón y un electrón.

Entonces, como se indica en la figura anterior, átomos de Hidrógeno provenientes de un horno inciden sobre una región donde existe un Campo Magnético, no homogéneo, a lo largo del eje  $Z$ ; obteniéndose a la salida de esta región dos orientaciones aleatorias a las que denotaremos como  $|+Z\rangle$  y  $|-Z\rangle$ .

A partir de este punto, la notación  $|\psi\rangle$  indicará un vector columna para  $\psi$  al que comúnmente denotaremos como KET de  $\psi$ .

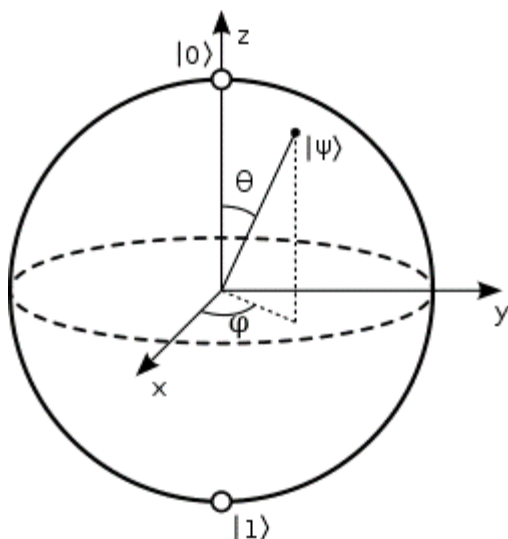
Hemos descrito con anterioridad que estas dos orientaciones corresponden físicamente al concepto del Momento Magnético Intrínseco del Electrón; mejor conocido como SPIN del Electrón.

En este punto, trataremos de describir lo observado partiendo del concepto de Qubit; observando que en cualquier caso los valores medidos “colapsan” a los valores  $+Z$  o  $-Z$ . La idea es relativamente sencilla y responde a la siguiente pregunta: ¿podemos utilizar el concepto de Qubit para explicar el experimento de Stern-Gerlach?

Una forma sencilla de acercarnos al concepto de Qubit simple está basada en la representación geométrica del vector:

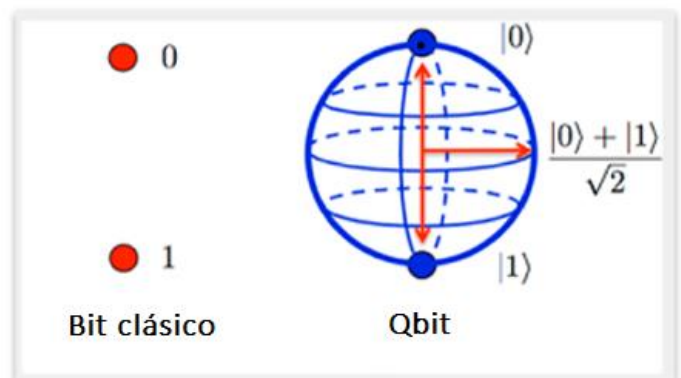
$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

Que como puede descubrirse resulta de la combinación lineal de los vectores:  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$



En la figura mostrada, conocida como esfera de Bloch, el vector  $|\psi\rangle$  se localiza en cualquier punto sobre la esfera y los vectores  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$  coinciden con los vectores  $|+Z\rangle$  y  $|-Z\rangle$  respectivamente.

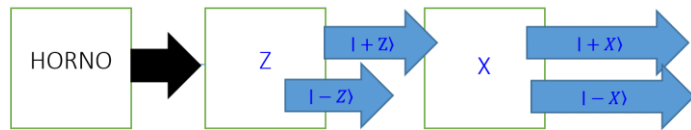
La cercanía del vector  $|\psi\rangle$  a  $|+Z\rangle$  o a  $|-Z\rangle$  habrá de indicarnos el valor al que habrá de colapsar  $|\psi\rangle$  en el momento de realizar una medición; tal y cual ocurre en el caso de la Computación Clásica con los valores 0 y 1.



<https://www.bbvaopenmind.com/wp-content/uploads/2016/10/qubit-1.jpg>

Sin hacer demasiado énfasis en la teoría, diremos que con respecto a los valores de los números (complejos) alfa y beta habrá de cumplirse que:  $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ ; la condición de normalización para la probabilidad de localizar al estado cuántico representado por el vector  $|\psi\rangle$ .

Ahora coloquemos dos aparatos de Stern-Gerlach uno seguido de otro, como se muestra en la siguiente figura:



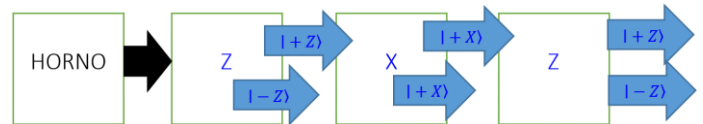
En este caso hemos bloqueado la salida  $| - Z \rangle$  del primer aparato de Stern-Gerlach, mientras que la salida de  $| + Z \rangle$  ingresa a través de un segundo aparato orientado a lo largo del eje  $X$ .

Un Dipolo Magnético Clásico en la dirección  $+Z$  no tendría momento magnético en la dirección  $X$ , por lo que cabría esperar que la salida final tuviera una única componente. No obstante, se observan dos componentes con igual intensidad.

La explicación de lo que ocurre con los átomos que pasan por el segundo aparato puede describirse como un estado que denotaremos  $| + Z \rangle + X \rangle$  o  $| + Z \rangle - X \rangle$ , para indicar los dos valores de espín que se observan.

Un tercer aparato, con orientación en la dirección  $Z$ , colocado enseguida del anterior en el que solamente introducimos la componente  $| + X \rangle$  se comportaría en forma similar al anterior; es decir, a la salida existirían ambas componentes

$| + Z \rangle$  y  $| - Z \rangle$  de igual intensidad.



Concluimos, con base en lo observado, que un estado  $| + Z \rangle$  consta de partes iguales de los estados  $| + X \rangle$  y  $| - X \rangle$  y un estado  $| + X \rangle$  consta de partes iguales de los estados  $| + Z \rangle$  y  $| - Z \rangle$ .

Para finalizar trataremos de explicar el comportamiento observado experimentalmente a partir del concepto de Qubit.

Sean  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$  los estados de un Qubit y considérense las siguientes asignaciones:

$$| + Z \rangle \leftarrow |0\rangle$$

$$| - Z \rangle \leftarrow |1\rangle$$

$$| + X \rangle \leftarrow (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2} ; \text{ y}$$

$$| - X \rangle \leftarrow (|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$$

Donde ya hemos visto la asignación geométrica para los ejes  $+Z$  y  $-Z$  en la esfera de Bloch; además para  $+X$  y  $-X$  se asignan valores de

alfa:  $1/\sqrt{2}$  y beta:  $1/\sqrt{2}$  y  $-1/\sqrt{2}$  respectivamente.

De tal suerte que, los dos aparatos de que se dispone miden el espín del electrón en bases distintas; el aparato orientado a lo largo de  $Z$  en la base  $|0\rangle, |1\rangle$  y el aparato orientado a lo largo de  $X$  en la base  $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}, (|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$ .

A la salida del primer aparato los espines permanecen en el estado:

$$|+Z\rangle = |0\rangle = (|+X\rangle + |-X\rangle)/\sqrt{2}$$

Así que, como puede mirarse en la figura correspondiente, la probabilidad de obtener  $|+X\rangle$  o  $|-X\rangle$  a la salida del segundo aparato debe ser  $1/2$ . Lo cual ocurre de igual forma para el tercer aparato en donde la

probabilidad de obtener  $|+Z\rangle$  o  $|-Z\rangle$  vuelve a ser  $1/2$ . En este punto debemos recordar que la probabilidad a la que nos referimos queda representada por el valor de alfa o beta elevado al cuadrado.

En futuros trabajos abordaremos con mayor detalle y en otro contexto el estudio del Qubit; como entidad fundamental en el estudio de la Computación y la Información Cuántica.

### Referencia

Nielsen, MA and Chuang, IL (2011). Quantum Computing and Quantum Information (10th Anniversary Edition). Cambridge University Press.

**Salvador Enrique Villalobos Pérez**

*villasalen@gmail.com*

**Martín Bárcenas Escobar**

*martin\_b\_e@hotmail.com*

**Profesores de la Facultad de Ingeniería de la UNAM**

---

---

***“Para lograr un éxito tecnológico, la realidad debe estar por encima de las relaciones públicas, porque la Naturaleza no puede ser engañada.”***

*Richard Feynman (1918-1988) Físico estadounidense.*

---

---

El contenido de los artículos publicados en este boletín es responsabilidad exclusiva de los autores.

Dudas o comentarios: [velasquez777@yahoo.com.mx](mailto:velasquez777@yahoo.com.mx)

**Editor: M. en C. Q. Alfredo Velásquez Márquez**